Journal of Agroecology
Vol. 12, No.4, Winter 2021, p. 561-580

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان۱۳۹۹، ص ۵۸۰-۵۶۱

مقاله علمی- پژوهشی

ارزیابی جامع مدل DSSAT-Nwheat در طیف وسیعی از مناطق اقلیمی ایران

محمدحسن فلاح[۱]، احمد نظامی[۲*]، حمیدرضا خزاعی[۲] و مهدی نصیری محلاتی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۲

فلاح، م.، نظامی، ا.، خزاعی، ح.، و نصیری محلاتی، م.، ۱۳۹۹. ارزیابی جامع مدل DSSAT-Nwheat در طیف وسیعی از مناطق اقلیمی ایران. بوم‌شناسی کشاورزی ۱۲(۴): ۵۸۰-۵۶۱.

چکیده

ارزیابی جامع مدل شبیه‌سازی محصول با مجموعه‌ای از داده‌های مناسب از محیط، مدیریت، ارقام و خاک‌های متفاوت برای استفاده مطمئن از مدل در تجزیه و تحلیل نظام‌های کشاورزی ضروری است. مدل Nwheat که اخیراً به DSSAT اضافه شده است با استفاده از مشاهدات آزمایش‌های مزرعه‌ای در دامنه وسیعی از مناطق اقلیمی با مدیریت مختلف برای چهار رقم گندم (*Triticum aestivum* L.) شامل شهریار، پیشتاز، تجن و چمران مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفت. این ارقام به‌ترتیب مناسب برای کشت در مناطق سردسیر، معتدل، مرطوب و گرمسیر می‌باشد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل DSSAT-Nwheat مراحل فنولوژیکی کاشت تا گل‌دهی و کاشت تا رسیدگی را به‌خوبی با مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر از چهار روز، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) کمتر از سه درصد و شاخص توافق ویلموت (d) نزدیک به یک شبیه‌سازی کرد. همچنین نتایج اعتبارسنجی عملکرد دانه ارقام گندم نشان داد که مقدار RMSE از ۵۶۸ کیلوگرم در هکتار برای رقم تجن تا ۹۳۳ کیلوگرم در هکتار برای رقم چمران متغیر بود. به‌طور کلی، nRMSE و d برای عملکرد دانه ارقام به‌ترتیب کمتر از ۲۰ درصد و بالاتر از ۰/۸ بود که دقت واسنجی را به‌خوبی نشان می‌دهد. واکنش مدل به افزایش دما در مناطق مختلف و سطوح مختلف CO_2 متفاوت بود. به‌طوری‌که در منطقه اهواز، گرگان و مشهد افزایش دما تا نه درجه سانتی‌گراد در تمام سطوح غلظت CO_2، باعث کاهش عملکرد دانه شد که البته افزایش CO_2 مقداری از اثرات منفی افزایش دما را تخفیف داد. امّا در منطقه سردسیر تبریز افزایش سه درجه سانتی‌گراد دما در سطوح غلظت ۳۶۰، ۵۴۰ و ۷۲۰ پی‌پی‌ام CO_2 به‌ترتیب باعث افزایش ۸، ۱۲ و ۱۴ درصدی عملکرد دانه شد، ولی با افزایش بیشتر دما تا نه درجه سانتی‌گراد، عملکرد دانه ۲۳، ۱۵ و ۱۰ درصد نسبت به دمای پایه کاهش یافت. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که مدل DSSAT-Nwheat پاسخ‌های عملکرد دانه به طیف گسترده‌ای از مدیریت و شرایط محیطی را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند و می‌توان از آن برای ارزیابی تأثیرات مختلف مدیریت زراعی و تصمیم‌گیری در نظام‌های کشت گندم در شرایط اقلیمی جاری و آینده استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، تغییر اقلیم، ضرایب ژنتیکی، مدل‌سازی، مراحل نموی

مقدمه

مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به‌طور گسترده‌ای برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در تجزیه و تحلیل نظام‌های کشت، ارزیابی اثرات اقلیمی و ارزیابی روش‌های مدیریت محصول مورد استفاده قرار می‌گیرند (Jones et al., 2003). این مدل‌ها می‌توانند برهم‌کنش‌های پیچیده خصوصیات خاک، شرایط اقلیمی، شیوه‌های مدیریت و ویژگی‌های ژنتیکی محصول را ادغام کنند که باعث درک بهتر از برهم‌کنش‌های پیچیده بین عوامل مؤثر بر رشد و نمو گیاهان می‌شوند (Kassie et al., 2016). یکی از جنبه‌های اصلی مدل‌های شبیه‌سازی محصول، امکان استفاده آن‌ها در شرایط مختلف اقلیمی و مدیریتی است، به شرطی که مدل مورد نظر در دامنه وسیعی از شرایط مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته باشد (Kassie et al., 2016).

۱- دانش‌آموخته دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
۲- استاد گروه اگروتکنولوژی دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: nezami@um.ac.ir)
Doi:10.22067/jag.v12i4.77250

از عواملی که بر شفافیت یک مدل تأثیر می‌گذارد، مسئله واسنجی مدل برای شرایط جدید است. در اغلب موارد، برای رسیدن به نتایج مطلوب در شرایط مختلف، باید چند پارامتر (معمولاً با سعی و خطا) کالیبره شوند. دقت روش واسنجی عمدتاً به نوع و کیفیت داده‌های اندازه‌گیری بستگی دارد. برای برآورد دقیق‌تر ضرایب ژنتیکی ارقام، توصیه می‌شود که آزمایش بیش از چندین تاریخ کاشت در همان محل یا برای تاریخ کاشت یکسان در مکان‌های مختلف انجام شود (Hoogenboom et al., 1999). چون عملکرد هر رقم گندم حاصل برهم‌کنش بین سه عامل ژنوتیپ، محیط و مدیریت (G×E×M) است. بنابراین برای برآورد دقیق ضرایب ژنتیکی (G) هر رقم می‌بایستی تنوع در شرایط مختلف محیطی (E) و مدیریتی (M) وجود داشته باشد. مناطق مختلف با اقلیم‌های متفاوت، سال‌های مختلف در هر منطقه و تاریخ‌های مختلف کاشت باعث تغییر در محیط رشد گیاه می‌شوند. متأسفانه در بسیاری از مطالعات، واسنجی مدل‌های رشد روی داده‌های محلی انجام شده (Saadati et al., 2016; Andarzian et al., 2008; Kiani et al., 2004; Mahru et al., 2010; Nouri et al., 2016) و عدم وجود شرایط مختلف محیطی باعث برآورد غیردقیق پارامترهای ژنتیکی ارقام و غیرقابل استفاده بودن آن مدل در مناطق با اقلیم متفاوت شده است. همچنین مدیریت آب و نیتروژن نیز نقش مهمی در عملکرد پیش‌بینی شده توسط مدل دارند. بنابراین، لازم است که حساسیت مدل نسبت به روش‌های مختلف مدیریت آب و نیتروژن مورد آزمون و اعتبارسنجی قرار گیرد.

بسیاری از مدل‌های شبیه‌سازی در چند دهه گذشته توسعه یافته‌اند و این مدل‌ها به‌طور فزاینده‌ای در مطالعات کشاورزی و زیست‌محیطی به‌عنوان ابزار مکمل آزمایش‌های مزرعه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Matthews et al. 2013). سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری زیستی (DSSAT[1]) یک سیستم مدل‌سازی است که به‌طور گسترده در مناطق مختلف جهان به‌عنوان ابزاری برای تحقیق و آموزش از آن استفاده می‌شود (Jones et al., 2003). DSSAT شامل زیرمدل‌هایی برای رشد و نمو محصول، بیلان آب خاک، عناصر غذایی و پویایی مواد آلی، مدیریت داده‌ها و یک موتور مرکزی است که فرآیندهای شبیه‌سازی را کنترل می‌کند و به‌عنوان یک ابزار پژوهش، می‌توان توصیه‌هایی در ارتباط با مدیریت محصول و بررسی مسائل زیست‌محیطی و پایداری را از آن استخراج کرد. این بسته شامل سیستم‌های مدیریت پایگاه داده‌ها برای خاک، آب‌وهوا، ضرایب ژنتیکی و ورودی مدیریت، مدل‌های شبیه‌سازی محصول، مجموعه‌ای از ابزار و برنامه‌های آب‌وهوا و برنامه ارزیابی استراتژی برای ارزیابی گزینه‌ها از جمله انتخاب ارقام، تاریخ کاشت، تراکم، فاصله ردیف، نوع خاک، آبیاری، کود، تنش آبی در مراحل رویشی و زایشی می‌باشد. در واقع، DSSAT ابزاری بسیار مفید برای کاهش قابل ملاحظه زمان و هزینه در آزمایش‌های مزرعه‌ای برای ارزیابی مناسب ارقام جدید و نظام‌های مدیریتی جدید است (Bannayan et al., 2003; Oteng-Darko et al., 2013).

Nwheat یک مدل شبیه‌سازی گندم است (Holzworth et al., 2014; Asseng et al., 1998; Keating et al., 2003) که با تغییرات مختلف از مدل CERES مشتق شده است (Ritchie et al., 1998). مهم‌ترین تغییرات در Nwheat جایگزینی روش معمول مصرف آب با یک رویکرد مبتنی بر یک بخش بحرانی آب خاک در دسترس، رابطه زیست‌توده با نیاز آبی محصول از طریق کارایی تعرق به‌جای تبخیر تعرق بالقوه و LAI، اضافه شدن یک فاکتور تنش نسبت به دمای بالا برای افزایش سرعت زوال برگ (در مدل CERES-Wheat فاکتور تنش گرما برای پیری برگ وجود ندارد) و اصلاح عملکرد کنترل تنش یخبندان، سطح ویژه برگ (SLA)، ضریب خاموشی نور (k) و شبیه‌سازی اثر تنش غرقابی بر رشد محصول می‌باشد (Keating et al., 2001). این تفاوت‌های مدل‌سازی منجر به تفاوت‌هایی در قابلیت شبیه‌سازی بین مدل‌های Nwheat و CERES-Wheat شده است.

مدل DSSAT-Nwheat با داده‌های آزمایشی در محیط‌های کنترل شده در مناطق اقلیمی مختلف جهان تأیید شده است (Kassie et al., 2016; Liu et al., 2016) و همچنین این مدل قبلاً در چارچوب APSIM نیز در بسیاری از مطالعات در نظام‌های کاشت گندم و در محیط‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته بود (Asseng et al., 2008, 1998; Heng et al., 2007; Bassu et al., 2011; O'Leary et al., 2015). ارزیابی مدل روشی معمول در استفاده از مدل در یک محیط جدید و یا در چارچوب مدل‌سازی جدید است (Matthews et al., 2013; Zacharias et al., 2015; Jones et al., 2001; Angulo et al., 2013). با این حال، اکثر مدل‌های رشد محصولات زراعی هنوز هم به‌خوبی در طیف گسترده‌ای از شرایط

1- Decision Support System for Agrotechnology Transfer

محیطی و مدیریتی و اثرات تغییر اقلیم ناشی از افـزایش دمـا و CO_2 مورد ارزیابی قرار نگرفته‌اند (White et al., 2011). لـذا هـدف ایـن مطالعه ارزیابی عملکرد مدل Nwheat در چارچوب جدیـد DSSAT v4.7، تحت شرایط مختلف محیطـی و مـدیریتی و همچنـین آنـالیز حساسیت مدل به پارامترهای اصلی تغییر اقلیم می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای و داده‌هـای مـورد نیـاز بـرای واسنجی و اعتبارسـنجی مـدل: هـر سـاله بـه‌منظـور بررسـی سـازگاری ژنوتیـپ‌هـای امیـدبخش گنـدم نـان آزمـایش‌هـایی در ایستگاه‌های تحقیقـات غـلات در کشـور تحـت عنـوان ERWYT[1] صورت می‌گیرد که در هر آزمایش یک رقم رایـج منطقـه بـه‌عنـوان شاهد در نظر گرفته می‌شود. لذا با با بررسی گزارش‌های نهـایی ایـن طرح‌های تحقیقاتی، چهـار رقـم تقریبـاً جدیـد کـه دارای داده‌هـای آزمایشی بودند و مناطق اقلیمی مختلف کشور را پوشش مـی‌دادنـد و هم‌اکنون نیز از سطح زیرکشت قابل توجهی برخوردار هستند، انتخاب شدند (جدول ۱). اطلاعاتی که از این طرح‌های تحقیقـاتی اسـتخراج شدند شامل محل اجرای طرح و سال اجرا، تاریخ کاشت، تراکم، تاریخ گل‌دهی و رسیدگی، عملکرد دانه، خاک محل آزمایش و مدیریت آب و نیتـروژن بودنـد (Esmaeilzadeh Moghaddam et al., 2011; Najafi Mirok et al., 2011; Najafian et al., 2010; Vahabzadeh et al., 2008). موقعیـت جغرافیـایی و مشخصـات ایستگاه‌های تحقیقاتی و تعداد سال‌های مورد استفاده برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در شکل ۱ و جدول ۲ آمده است.

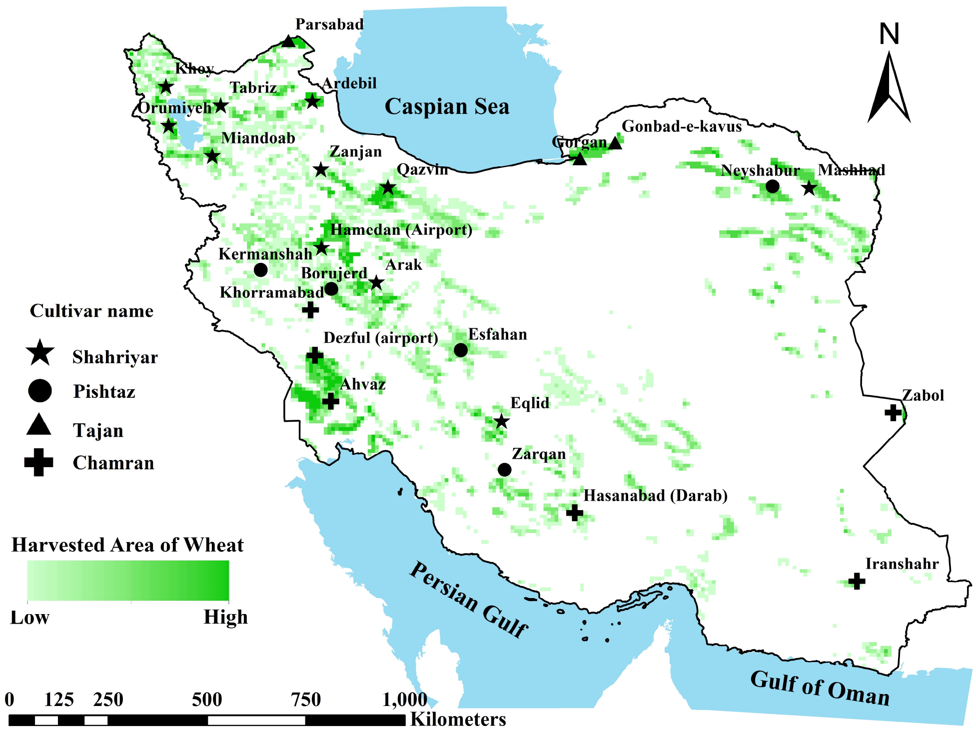
در هر منطقه با حدود نیمی از داده‌ها (سال‌های اجرا) مدل مـورد واسنجی قرار گرفت و با نیم دیگر اعتبارسنجی مدل انجام شد (جدول ۲). برای هر منطقـه، داده‌هـای هواشناسـی شـامل دمـای حـداقل و حداکثر روزانه، بارندگی، تشعشع (محاسبه شـده بـا اسـتفاده از تعـداد ساعات آفتابی)، رطوبت نسبی و سرعت باد آماده شد و توسـط ابـزار WeatherMan نرم‌افزار DSSAT 4.7، فایـل داده‌هـای هواشناسـی ساخته شد. همچنین فایل خصوصیات خاک بـه‌تفکیـک مکـان‌هـای آزمایش از قبیل بافت خاک، ظرفیت نگهداری آب، میزان ماده آلی و اسیدیته خاک در لایه‌های مختلف خاک توسط ابزار SBuild ساخته و به DSSAT معرفی شد (جدول ۳).

توصیف مدل: در این مطالعه از نسخه ۴/۷ نرم‌افـزار DSSAT اسـتفاده شـد (Hoogenboom et al., 2017). مـدل Nwheat بـر اساس مدل CERES-Wheat توسعه داده شـده اسـت (Ritchie et al., 1998). این مدل رشد و نمـو محصـول، تـوازن و پویـایی آب و نیتروژن و همچنین عوامل تنش‌زا و تنش‌هـای مختلـف در گنـدم را به‌طور روزانه شبیه‌سازی می‌کند (Keating et al., 2001; Asseng et al., 2004). فنولوژی محصول در Nwheat، تـابعی از درجـه روز رشد تجمعی، دوره فتوپریود و بهاره‌سازی است. تولیـد مـاده خشـک پتانسیل به‌وسیله کارایی استفاده از تشعشع، تابش خورشـیدی، دمـا و شاخص سطح برگ (LAI) کنترل مـی‌شـود. تـأمین نـامطلوب آب و نیتروژن می‌تواند تولید ماده خشک پتانسیل را کاهش دهد. نیاز آبـی پتانسیل محصول، تابعی از کارایی تعرق و کسر فشار بخار است. نیاز آبی واقعی بستگی به تقاضای گیاه، تراکم ریشه و میزان آب موجود در پروفیل خاک دارد. عملکرد دانه نیز بستگی بـه تعـداد دانـه، دوره پـر شدن دانه و انتقال مجدد کربوهیدرات‌ها دارد.

شبیه‌سازی پویایی نیتروژن گیاه مشابه مـدل CERES-Wheat است که در آن تابعی از محتوای نیتروژن اجزای مختلف گیاه، ظرفیت پتانسیل جذب نیتروژن در سیستم ریشه، نیـاز نیتروژنـی محصـول و انتقال مجدد نیتروژن است (Ritchie et al., 1998). محتوی نیتروژن هر اندام گیاهی به‌عنوان تابعی از مرحله رشد گیاه محاسبه مـی‌شـود. پویایی توازن آب با خصوصیات خاک ارائه شده به‌عنوان ورودی مدل برای محاسبه نسبت‌های حجمی آب خاک در حالت پژمردگی (LL)، ظرفیت زراعی (DUL) و در حالـت اشـباع (SAT) تعیـین مـی‌شـود. توازن آب با استفاده از یک رویکرد آبشاری مدل‌سازی می‌شود، به این معنی که زمانی‌که محتوای آب یک لایه خاک بیش از ظرفیت زراعی باشد، آب به‌صورت عمودی از بالا به پایین حرکت می‌کند. این مدل اثر مالچ و بقایا را بر رواناب و تبخیر خاک در نظر می‌گیرد.

ورودی‌هـای مـدل: DSSAT-Nwheat هماننـد بسـیاری از مـدل‌هـای دینـامیکی دیگـر، نیازمنـد ورودی‌هـایی اسـت کـه داده هواشناسی روزانه، خصوصیات رشد و نمو رقم، رویدادهای مدیریتی و خصوصیات خاک را توصیف کند. حداقل داده هواشناسـی مـورد نیـاز شامل دمای روزانه (حداقل و حداکثر)، تشعشع، بارنـدگی و اطلاعـات ایستگاه (عرض جغرافیایی و ارتفاع) است.

1- Elite Regional Wheat Yield Trials



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های تحقیقاتی آزمایش‌های مزرعه‌ای و مناطق زیرکشت گندم آبی

Fig. 1- Indicated locations of field research experiment and harvested area of irrigated wheat

جدول ۱- برخی از خصوصیات مهم ارقام مورد مطالعه

Table 1- Some important characteristic of the studied cultivars

خصوصیت **Character**	شهریار **Shahriyar**	پیشتاز **Pishtaz**	تجن **Tajan**	چمران **Chamran**
سال معرفی Release year	2002	2002	1995	1997
مناطق مناسب برای کشت Suitable areas for cultivation	سردسیر Cold	معتدل Temperate	مرطوب Humid	گرم جنوب Tropical
عادت رشدی Growth habit	زمستانه Winter	بهاره Spring	بهاره Spring	بهاره Spring
میانگین عملکرد دانه Average of grain yield ($kg.ha^{-1}$)	6720	7400	6300	5600
واکنش به خوابیدگی Lodging resistance	مقاوم Resistant	مقاوم Resistant	مقاوم Resistant	نیمه‌حساس Semi sensitive
واکنش به ریزش دانه Threshing resistant	مقاوم Resistant	مقاوم Resistant	نیمه مقاوم Semi resistant	حساس Sensitive
میانگین درصد پروتئین Average of grain protein	12.2	11.5	12.0	10.4
میانگین وزن هزار دانه Average of 1000- grain weight (g)	38	44	38	39

Source: SPII (2015)

جدول ۲- مشخصات اقلیمی مناطق آزمایشی مورد استفاده برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل

Table 2- Specifications of experimental data used for calibrating and validating the model

رقم Cultivar	منطقه Location	تعداد سال استفاده شده برای Number of years for		طول جغرافیایی long.	عرض جغرافیایی lat.	ارتفاع Alt. (m)	میانگین دمای حداقل Mean Tmin (°C)	میانگین دمای حداکثر Mean Tmax (°C)	میانگین بارش Annual rainfall (mm)
		واسنجی Calibration	اعتبارسنجی Evaluation						
شهریار Shahriyar	اراک Arak	4	5	49.78	34.72	1703	7.1	20.8	333
	اردبیل Ardebil	2	3	48.42	38.33	1314	2.2	15.9	224
	اقلید Eqlid	3	3	52.63	30.90	2300	6.2	19.6	323
	همدان Hamedan	4	4	48.41	34.14	1678	6.5	21.1	376
	خوی Khoy	1	2	45.00	38.56	1103	5.5	18.7	290
	مشهد Mashhad	4	5	59.63	36.24	999	8.6	21.9	252
	میاندوآب Miandoab	3	4	46.50	36.97	1300	5.6	19.9	294
	قزوین Qazvin	4	4	52.59	35.70	1279	6.9	21.3	316
	تبریز Tabriz	4	4	46.24	38.12	1361	7.2	18.2	280
	ارومیه Uromieh	1	2	45.55	37.66	1230	5.1	17.6	326
	زنجان Zanjan	2	3	48.52	36.66	1659	4.0	18.0	300
پیشتاز Pishtaz	بروجرد Broujerd	3	3	48.76	33.92	1629	8.3	21.4	453
	اصفهان Esfahan	3	3	51.71	32.52	1550	9.2	23.5	126
	کرمانشاه Kermanshah	3	3	47.15	34.35	1319	6.1	22.8	436
	مشهد Mashhad	2	3	59.63	36.24	999	8.6	21.9	252
	نیشابور Neyshabour	2	3	58.80	36.27	1213	6.8	22.0	243
	زرقان Zarqan	2	2	52.70	29.78	1596	8.0	25.1	322
تجن Tajan	گنبد Gonbad	4	4	55.21	37.27	37	12.8	24.6	450
	گرگان Gorgan	4	4	54.41	36.91	0	12.7	22.9	587
	پارس‌آباد Parsabad	4	4	47.78	39.60	73	9.8	20.6	277
چمران Chamran	اهواز Ahwaz	5	6	48.74	31.34	23	17.9	33.0	209
	داراب Darab	5	6	54.30	28.79	1098	14.4	29.8	251

دزفول Dezful	5	6	48.38	32.40	143	16.1	32.3	389
ایرانشهر Iranshahr	5	5	60.72	27.23	591	19.3	34.2	113
خرم‌آباد Khorramabad	5	6	48.28	33.44	1148	9.1	25.3	495
زابل Zabol	4	5	61.54	31.89	489	14.7	29.7	58

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مناطق مختلف

Table 3- Soil physico-chemical properties of different locations

منطقه Location	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	نقطه پژمردگی دائم Permanent wilting point	نقطه ظرفیت زراعی Field capacity	رطوبت اشباع Saturation	وزن مخصوص ظاهری Bulk density ($g.cm^{-3}$)	کربن آلی Organic carbon (%)	اسیدیته pH
اراک Arak	23.1	34.4	42.5	0.14	0.26	0.40	1.40	0.67	8.4
اردبیل Ardebil	24.0	32.6	43.4	0.15	0.27	0.40	1.32	1.02	7.8
اقلید Eqlid	22.5	32.7	44.8	0.14	0.26	0.40	1.36	0.77	8.2
همدان Hamedan	21.6	34.1	44.3	0.13	0.25	0.40	1.41	0.74	8.2
خوی Khoy	23.8	34.3	41.9	0.14	0.27	0.40	1.41	0.97	7.8
مشهد Mashhad	20.1	36.0	43.9	0.12	0.25	0.39	1.33	0.86	8.3
میاندوآب Miandoab	27.7	33.9	38.4	0.17	0.29	0.41	1.43	0.77	7.7
قزوین Qazvin	24.8	31.8	43.4	0.15	0.27	0.40	1.37	0.99	7.7
تبریز Tabriz	23.8	35.3	40.9	0.14	0.27	0.40	1.41	0.66	8.1
ارومیه Uromieh	23.4	33.6	43.0	0.14	0.26	0.40	1.39	0.76	7.6
زنجان Zanjan	23.1	33.0	43.9	0.14	0.26	0.40	1.42	0.74	8.0
بروجرد Broujerd	24.8	32.7	42.5	0.15	0.27	0.40	1.42	0.64	8.0
اصفهان Esfahan	21.7	34.2	44.1	0.13	0.25	0.40	1.41	0.64	8.5
کرمانشاه Kermanshah	26.7	33.2	40.1	0.16	0.29	0.41	1.43	0.75	8.2
نیشابور Neyshabour	20.4	36.0	43.6	0.12	0.25	0.39	1.38	0.57	8.4
زرقان Zarqan	23.7	32.6	43.7	0.14	0.26	0.40	1.44	0.70	8.2
گنبد Gonbad	17.6	30.9	51.5	0.11	0.22	0.39	1.51	0.67	7.8
گرگان Gorgan	24.3	33.5	42.2	0.15	0.27	0.40	1.42	2.38	6.6
پارس‌آباد Parsabad	21.0	33.5	45.5	0.13	0.25	0.39	1.52	0.66	7.6

اهواز Ahwaz	22.4	34.3	43.3	0.14	0.26	0.40	1.58	0.46	8.2
داراب Darab	22.7	33.3	44.0	0.14	0.26	0.40	1.39	0.73	8.1
دزفول Dezful	24.2	33.5	42.3	0.15	0.27	0.40	1.62	0.56	8.0
ایرانشهر Iranshahr	23.8	31.6	44.6	0.14	0.26	0.40	1.48	0.63	8.2
خرمآباد Khorramabad	28.0	34.3	37.7	0.17	0.30	0.41	1.45	0.77	8.3
زابل Zabol	21.8	30.6	47.6	0.13	0.25	0.39	1.52	0.57	8.1

این مدل از هشت ضریب ژنتیکی اصلی برای هـر رقـم اسـتفاده می‌کند: نیاز به بهاره‌سازی، حساسیت فتوپریودی، درجه روز مورد نیاز از جوانه‌زنی تا آغازش گل، درجه روز مورد نیاز از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی، نسبت تعداد دانه بر وزن زیست‌توده، سرعت رشـد دانـه، حداکثر وزن خشک ساقه و فاصله فیلـوکرون (جـدول ۴). درجـه روز مورد نیاز از جوانه‌زنی تا آغازش گل (P1) در ارقام گندم متفاوت است و حساسـیت بـه بهـاره‌سـازی (VSEN) و فتوپریـود (PPSEN) بـر فنولوژی این دوره اثر می‌گذارد. همچنین درجه روز مورد نیاز از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیک نیز توسـط پـارامتر P5 کنتـرل می‌شود. پتانسیل عملکرد دانه توسط ضریب تعداد دانـه (GRNO) و حداکثر سرعت رشد دانه (MXFIL) کنترل می‌شود. پنجه‌زنی بستگی به وزن خشک پتانسیل تک ساقه (STMMX) دارد. ظهور بـرگ بـا درجه روز تجمعی با استفاده از فاصـله فیلـوکرون کنتـرل مـی‌شـود. ورودی‌های اصلی خاک نیز عبارتند از: مقدار اولیه آب خاک، حجم آب خاک در حالت پژمردگی، ظرفیت زراعی و اشباع، ضرایب زهکشـی و رواناب، فاکتورهای رشد ریشه، تبخیر اولیه و آلبدو خاک که به‌تفکیک هر ایستگاه به مدل وارد شد. اطلاعات مدیریت زراعی شـامل تـاریخ کاشت و عمق کاشت، تراکم، میزان و تاریخ مصرف کود و آب آبیاری و همچنین شرایط اولیه آب و محتوای نیتروژن خاک بود.

جدول ٤- ضرایب ژنتیکی واسنجی شده برای ارقام مختلف گندم

Table 4- Main genetic coefficients used in model for different wheat cultivars

تعریف پارامتر Parameter definition	واحد Unit	پارامتر Parameter	شهریار Shahriyar	پیشتاز Pishtaz	تجن Tajan	چمران Chamran
حساسیت به بهاره‌سازی Sensitivity to vernalization	-	VSEN	2.05	1.00	1.00	1.00
حساسیت به فتوپریود Sensitivity to photoperiod	-	PPSEN	5.7	5.2	4.9	4.8
درجه روز مورد نیاز از جوانه‌زنی تا آغازش گل Thermal time from emergence to the end of juvenile	°C	P1	300	280	270	250
درجه روز مورد نیاز از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی Thermal time from beginning of grain filling to maturity	°C	P5	720	780	700	720
فاصله فیلوکرون Phyllochron interval	°C	PHINT	85	83	82	80
تعداد دانه بر وزن ساقه در زمان شروع پر شدن دانه Coefficient of kernel number per stem weight at the beginning of linear grain filling	kernels.stem weight^{-1}	GRNO	37	36	28	34
حداکثر سرعت رشد دانه Potential kernel growth rate	mg kernel^{-1}.day^{-1}	MXFIL	1.8	2.6	2.4	2.4
پتانسیل وزن خشک نهایی تک ساقه Potential final dry weight of a single tiller excluding grain	g	STMMX	3	3	3	3

واسنجی و اعتبارسنجی مدل: به‌طور کلی، برای برآورد پارامترهای مدل‌های رشد محصولات زراعی دو روش وجود دارد: ۱- روش پارامتریابی[1] یعنی برآورد هر پارامتر با توجه به مفهوم و تعریف آن و از طریق آزمایش‌های دقیق و ۲- روش واسنجی[2] که بنا به تعریف وانگ و همکاران (Wang et al., 2011)، یعنی تنظیم پارامترهای مدل در محدوده معقول آن‌ها، به‌طوری‌که نتایج شبیه‌سازی شده قابل مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده باشد. برخی منتقدین واسنجی مانند سینکلر و سلیگمن (Sinclair and Seligman, 2000) استدلال می‌کنند که یک مدل محصول باید بر اساس معادلات فرآیندی که به‌صورت مستقل قابل مطالعه باشند، پایه‌گذاری شده باشد و پارامترهای مدل محصول از چنین مطالعاتی قابل حصول باشند. طرف دیگر این استدلال، این است که در اغلب موارد، این روش نمی‌تواند مقادیر رضایت‌بخش برای تمامی پارامترهای مدل را از مطالعات فرآیندها به‌دست آورد و در نتیجه، واسنجی لازم است. فث و جورگنسن (Fath & Jorgensen, 2011) عنوان کردند که واسنجی لازم است، زیرا برخی از مقادیر پارامترها در نشریات علمی قابل دستیابی نیستند و برخی از مقادیر موجود، دقیقاً همان چیزی نیست که برای مدل مورد نیاز است. پارامترها ممکن است تا حدودی از مقادیر واقعی امّا ناشناخته در طبیعت، متفاوت باشند. بعضی از مدل‌ها نیاز به بیش از ۲۰ ضریب برای تعیین ویژگی‌های ژنوتیپ دارند که باید واسنجی شوند. علاوه‌براین، تقریباً غیرممکن است که تمام این ضرایب را بتوان از آزمایش‌های مستقل به‌دست آورد. البته از این مورد نباید سوء برداشت شود که واسنجی، مقادیر دقیق‌تری از پارامترها را می‌دهد. واسنجی فقط برای چند پارامتر مدل انجام می‌شود و ضروری است، زیرا ما نیاز به جبران اشتباهات در تمام پارامترهایی که در واسنجی تخمین زده نشدند را داریم.

در این مطالعه، از روش دوم یعنی واسنجی برای برآورد پارامترهای مدل استفاده شد. چون مدل Nwheat به‌تازگی در چارچوب DSSAT ارائه شده است، ابزارهای برآورد ضرایب ژنتیکی موجود در نرم‌افزار مانند GLUE و GenCalc هنوز مدل مذکور را پشتیبانی نمی‌کنند. بنابراین برآورد پارامترها بر اساس سعی و خطا و با توجه به مفهوم و تعریف هر پارامتر در محدوده معقول آن‌ها و همچنین با استفاده از ابزار Sensitivity نرم‌افزار DSSAT برای رسیدن به حداقل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد. یک روش سیستماتیک برای واسنجی اکثر مدل‌های رشد محصولات ارائه شده و آن بدین صورت است که ابتدا بایستی تاریخ گل‌دهی و تاریخ رسیدگی و سپس تجمع ماده خشک و شاخص سطح برگ و در نهایت، اجزای عملکرد و عملکرد دانه مورد واسنجی قرار گیرد (Hoogenboom et al., 1999). در این مدل پارامترهای P1، VSEN، PPSEN و PHINT بر تاریخ گل‌دهی تأثیر می‌گذارند (جدول ۴). این مرحله واسنجی، مشکل‌ترین و البته مهم‌ترین مرحله واسنجی است، ولی استفاده از داده‌های تاریخ گل‌دهی در طیف وسیعی از اقلیم و سال‌های مختلف، در برآورد دقیق‌تر این ضرایب بسیار مفید خواهد بود. پس از رسیدن به RMSE کوچک‌تر از پنج روز برای تاریخ گل‌دهی، با تغییر دادن پارامتر P5 تاریخ رسیدگی مورد واسنجی قرار گرفت که هر چه مقدار P5 بزرگ‌تر باشد، آن رقم دیررس‌تر می‌شود. در این مرحله چون فقط با یک پارامتر سر و کار داریم واسنجی آن آسان‌تر است. مقدار RMSE کمتر از هفت روز برای تاریخ رسیدگی مناسب در نظر گرفته شد. در مرحله بعد نوبت به پارامترهای GRNO، STMMX و MXFIL رسید که به‌طور هم‌زمان مورد واسنجی قرار گرفتند تا به‌مقدار nRMSE قابل قبول (۱۰ تا ۲۰ درصد) برای عملکرد دانه برسیم. شاخص‌های آماری که برای مقایسه نتایج داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل با داده‌های واقعی مورد استفاده قرار گرفت شامل RMSE، جذر میانگین خطای نرمال شده (nRMSE)، شاخص توافق ویلموت (d)، خطای متوسط (ME) و ضریب تشخیص (R^2) بود. از RMSE جهت مقایسه اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده استفاده شد. چنانچه مقدار nRMSE کمتر از ۱۰٪ باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰٪ خوب، بین ۲۰ تا ۳۰٪ متوسط و بیشتر از ۳۰٪ ضعیف ارزیابی می‌شود (Yang et al., 2014). همچنین هر چه مقدار d به‌دست آمده توسط مدل به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده و توانسته است میزان پیش‌بینی را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده شده انجام دهد (Willmott, 1982).

آنالیز حساسیت مدل: آزمون حساسیت مدل به دی‌اکسیدکربن و دما مورد سنجش قرار گرفت. در این مطالعه از داده‌های هواشناسی ۳۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۸۱) ایستگاه‌های هواشناسی تبریز، مشهد، گرگان و اهواز به‌ترتیب به‌عنوان نماینده منطقه مناسب

1- Parameterization
2- Calibration

کشت ارقام شهریار، پیشتاز، تجن و چمران استفاده شد تا واکنش مدل به تغییرات داده‌های ورودی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای سناریوهای آنالیز حساسیت، ترکیب تیماری دمای فعلی و افزایش سه، شش و نه درجه سانتی‌گرادی دمای حداقل و حداکثر روزانه هر منطقه و سه سطح غلظت CO_2 اتمسفر ۳۶۰، ۵۴۰ و ۷۲۰ پی‌پی‌ام انتخاب شدند. با استفاده از قسمت Seasonal Analysis نرم‌افزار DSSAT ۱۲ تیمار ترکیبی از دما و CO_2 ساخته شد و مدل در دوره ۳۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۸۱) اجرا گردید.

نتایج و بحث

واسنجی مدل: نتایج برآورد ضرایب ژنتیکی برای چهار رقم گندم در جدول ۴ ارائه شده است. از آن‌جا که رقم شهریار یک رقم زمستانه است و نیاز به بهاره‌سازی دارد، پارامتر حساسیت به بهاره‌سازی ۲/۰۵ برآورد شد. برای سایر ارقام که بهاره بودند این مقدار یک منظور شد. حساسیت ارقام به فتوپریود نیز از ۴/۸ تا ۵/۷ متفاوت بود (جدول ۴). مقادیر درجه روز مورد نیاز از جوانه‌زنی تا آغازش گل و همچنین شروع پر شدن دانه تا رسیدگی این ارقام متفاوت ولی نزدیک به هم بود (جدول ۴). هر چه مقادیر P_1 و P_5 بزرگ‌تر باشد، آن رقم دیررس‌تر می‌شود. در مدل Nwheat پارامتر فیلوکرون (PHINT) تأثیر مستقیم بر طول مراحل نموی و پارامترهای رشدی به‌ویژه شاخص سطح برگ دارد. پارامترهای GRNO و STMMX که اثر مستقیم بر تعداد دانه در سنبله دارند و همچنین MXFIL که سرعت پر شدن دانه را تعیین می‌کند، پارامترهای تعیین‌کننده عملکرد هستند که مقادیر آن‌ها برای هر رقم برآورد شد (جدول ۴). درک برهم‌کنش بین این پارامترها در مدیریت‌ها و اقلیم‌های متفاوت باعث برآورد دقیق پارامترها و شبیه‌سازی دقیق عملکرد دانه در مدل می‌شود.

مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی و عملکرد دانه پس از مرحله واسنجی مدل به‌تفکیک هر منطقه در جدول ۵ ارائه شده است. تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی ارقام در مناطق مختلف با دقت خوبی شبیه‌سازی شد. آماره‌های RMSE، nRMSE و d برای صفات روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی نشان داد که واسنجی مدل برای مراحل نموی با دقت بالایی انجام شده است (جدول ۶). اینکه مدل در مناطق مختلف با طول دوره رشدی قادر به شبیه‌سازی مراحل نموی است، نشان‌دهنده دقت بالای واسنجی مدل است. به‌عنوان مثال رقم شهریار در منطقه مشهد با متوسط دوره رشدی ۲۳۱ روز و منطقه اردبیل با طول دوره رشدی ۲۹۷ روز را با دقت خوبی شبیه‌سازی کرده است (جدول ۵). همچنین برای رقم چمران در مناطق با طول دوره رشد متفاوت ۱۱۳ روز در ایرانشهر تا ۲۰۸ روز در خرم‌آباد، مشاهده می‌شود که دقت مدل در شبیه‌سازی مراحل نموی عالی بوده است (جدول ۵).

اهمیت واسنجی مراحل نموی از آن جهت بالاست که این مراحل تأثیر مستقیمی بر شبیه‌سازی رشد و عملکرد دارند و به عبارتی، پیش‌نیاز کالیبراسیون تولید ماده خشک و عملکرد می‌باشد. نتایج مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در مرحله واسنجی مدل برای عملکرد دانه نیز نشان داد که میانگین عملکرد شبیه‌سازی شده هر چهار رقم در مناطق مختلف اقلیمی به مقادیر مشاهده شده بسیار نزدیک بوده است (جدول ۵). همچنین مقدار RMSE کوچک‌تر از ۷۳۰ کیلوگرم در هکتار، nRMSE کمتر از ۱۳ درصد و d بیشتر از ۰/۶۵ بود که دقت واسنجی در برآورد پارامترهای مدل را به‌خوبی نشان می‌دهد (جدول ۶). اگر چه مطالعات ارزیابی مدل برای ارقام هر منطقه خاص است و به‌طور مستقیم قابل مقایسه نیستند، ولی RMSE بین عملکرد مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در این تحقیق قابل مقایسه با یافته‌های دیگر محققان (Hussain et al., 2018; Singh et al., 2008) در مورد ارزیابی مدل می‌باشد.

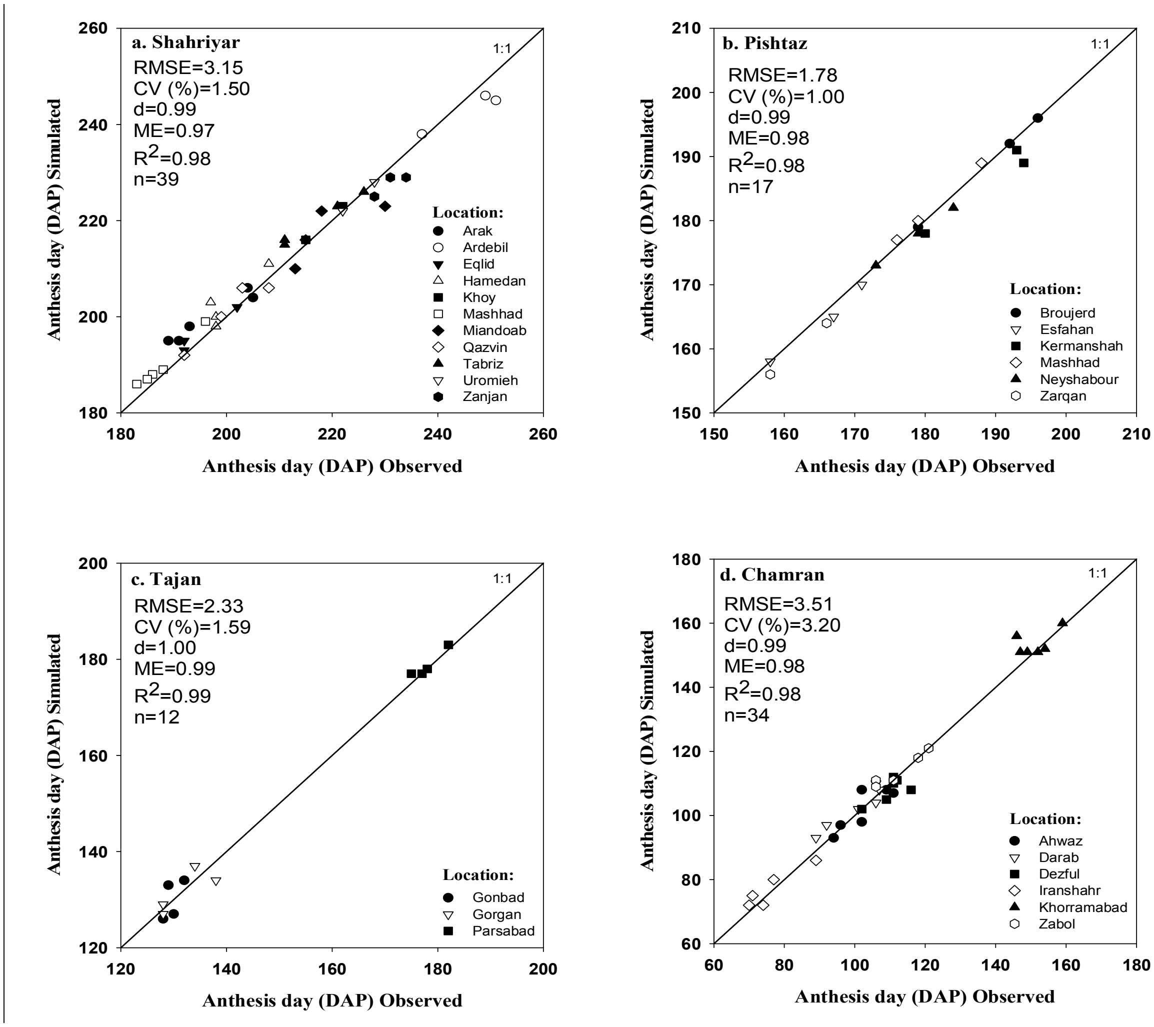
اعتبارسنجی مدل: برای تعیین اعتبار مدل از مجموعه‌ای از داده‌های آزمایش‌هایی که در برآورد ضرایب ژنتیکی مدل در مرحله واسنجی به‌کار نرفته بودند، استفاده شد (جدول ۲). نتایج اعتبارسنجی طول دوره کاشت تا گل‌دهی ارقام در شکل ۲ نشان داده شده است. مقادیر RMSE کوچک‌تر از چهار روز، nRMSE کمتر از سه درصد و d نزدیک به یک نشان از دقت بالای واسنجی مدل دارد. این دقت بالا در مورد مرحله فنولوژیکی کاشت تا رسیدگی هر چهار رقم گندم نیز مشاهده شد (شکل ۳). این معیارهای آماری نشان از توانایی خوب مدل در شبیه‌سازی صفات فنولوژیکی ارقام مختلف گندم در آزمایش‌های مناطق مختلف و سال‌های مختلف می‌باشد. پیش‌بینی نمو فنولوژیک یا مراحل نموی گیاه اهمیت زیادی دارد چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حدود زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی می‌باشد. به همین ترتیب، ممکن است پیش‌بینی تغییرات سطح برگ و سایر فرآیندها به پیش‌بینی نمو فنولوژیک وابسته باشند (Soltani et al., 2006).

جدول ۵- مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی و عملکرد دانه چهار رقم گندم با استفاده از مدل DSSAT-Nwheat

Table 5- Calibration results for DSSAT-Nwheat in predicting anthesis day, maturity day, and grain yield for four wheat cultivars

رقم Cultivar	منطقه Location	روز از کاشت تا گرده افشانی Anthesis day after planting (DAP)		روز از کاشت تا رسیدگی Maturity day after planting (DAP)		عملکرد دانه Grain yield (kg.ha^{-1})	
		مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated
شهریار Shahriyar	اراک Arak	203	204	247	246	5604	5389
	اردبیل Ardebil	241	239	297	296	6790	6410
	اقلید Eqlid	200	201	246	247	4925	5416
	همدان Hamedan	204	207	254	253	5848	5302
	خوی Khoy	220	219	264	265	6870	7499
	مشهد Mashhad	190	194	231	235	5989	5932
	میاندوآب Miandoab	219	220	265	266	5797	6180
	قزوین Qazvin	202	203	243	245	5835	5660
	تبریز Tabriz	219	221	265	264	6146	6536
	ارومیه Uromieh	226	226	269	273	7466	6165
	زنجان Zanjan	226	228	276	275	5707	5807
	Average	**214**	**215**	**260**	**260**	**6089**	**6027**
پیشتاز Pishtaz	بروجرد Broujerd	187	189	233	237	5851	5912
	اصفهان Esfahan	165	163	212	209	5809	5827
	کرمانشاه Kermanshah	183	184	232	232	6366	5663
	مشهد Mashhad	178	181	228	226	6357	6070
	نیشابور Neyshabour	179	181	228	229	5657	5962
	زرقان Zarqan	162	165	215	215	5607	4898
	Average	**176**	**177**	**225**	**224**	**5941**	**5722**
تجن Tajan	گنبد Gonbad	131	132	175	176	4266	4168
	گرگان Gorgan	130	131	178	176	4036	4246
	پارس‌آباد Parsabad	179	179	221	222	5095	5442
	Average	**147**	**147**	**191**	**192**	**4466**	**4618**

چمران Chamran	اهواز Ahwaz	102	98	147	144	5045	5830
	داراب Darab	98	100	142	144	5621	5846
	دزفول Dezful	108	107	149	152	5292	5236
	ایرانشهر Iranshahr	77	76	113	113	4261	3907
	خرم‌آباد Khorramabad	156	154	208	207	7006	7202
	زابل Zabol	117	114	157	154	4426	3813
	Average	**110**	**108**	**153**	**152**	**5275**	**5306**

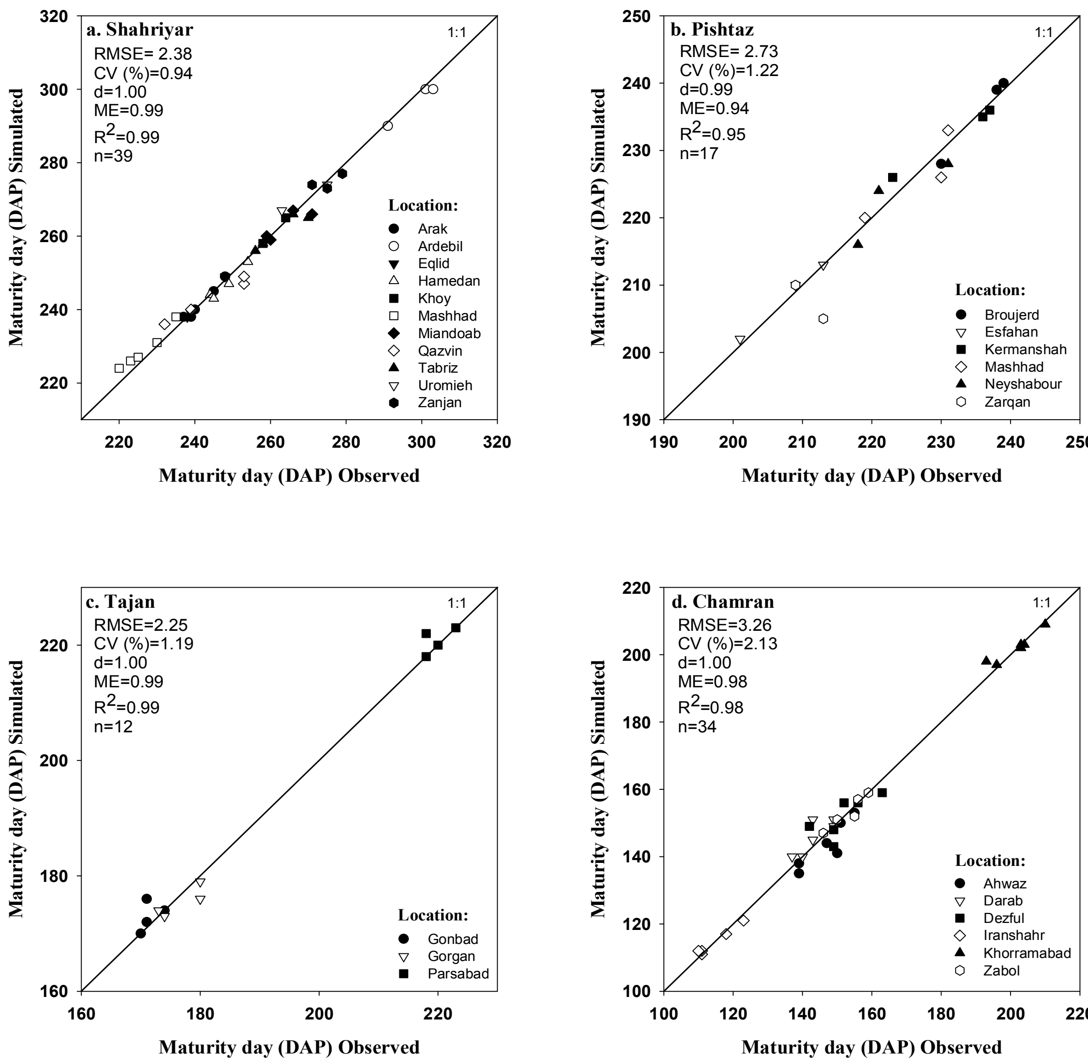


شکل ۲- روز تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده در مقابل روز تا گل‌دهی مشاهده شده ارقام a) شهریار، b) پیشتاز، c) تجن و d) چمران

خط ۱:۱ و پارامترهای آماری نتایج اعتبارسنجی در شکل نشان داده شده است.

Fig. 2- Observed versus simulated anthesis day after planting with the DSSAT-Nwheat model for wheat cultivars a) Shahriyar, b) Pishtaz, c) Tajan, and d) Chamran

Line 1:1 and statistics for evaluating model performance were shown in each graph.



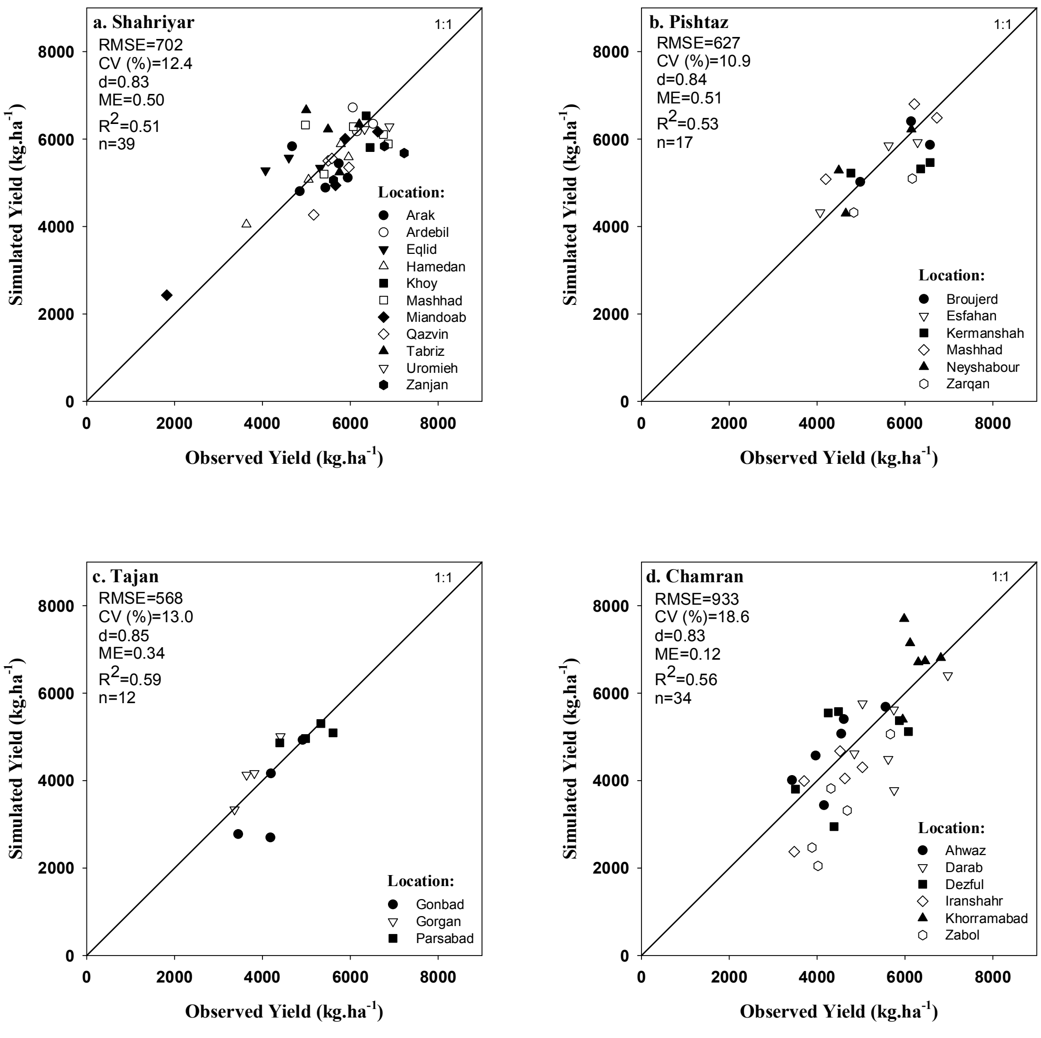
شکل ۳- روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده در مقابل روز تا رسیدگی مشاهده شده ارقام a) شهریار، b) پیشتاز، c) تجن و d) چمران

Fig. 3- Observed versus simulated maturity day after planting with the DSSAT-Nwheat model for wheat cultivars a) Shahriyar, b) Pishtaz, c) Tajan, and d) Chamran

خط ۱:۱ و پارامترهای آماری نتایج اعتبارسنجی در شکل نشان داده شده است.

Line 1:1 and statistics for evaluating model performance were shown in each graph.

همچنین نتایج اعتبارسنجی عملکرد دانه چهار رقم گندم نشان داد که مقدار RMSE از ۵۶۸ کیلوگرم در هکتار برای رقم تجن تا ۹۳۳ کیلوگرم در هکتار برای رقم چمران متغیر بود. ولی از لحاظ nRMSE رقم پیشتاز از دقت بالاتری برخوردار بود. به‌طور کلی، nRMSE و d برای عملکرد دانه ارقام به‌ترتیب کوچک‌تر از ۲۰ درصد و بالاتر از ۰/۸ بود که دقت کالیبراسیون را خوب نشان می‌دهد (شکل ۴). کیانی و همکاران (Kiani et al., 2004) مراحل فنولوژی را برای شش رقم گندم در دو منطقه بیرجند و مشهد به‌وسیله مدل CERES-Wheat شبیه‌سازی و گزارش نمودند که مدل با دقت بالایی (کمتر از ۱۰ درصد میانگین مشاهدات) مراحل فنولوژیک ارقام گندم را در دو منطقه شبیه‌سازی نموده است.



شکل ٤- عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد دانه مشاهده شده ارقام a) شهریار، b) پیشتاز، c) تجن و d) چمران

Fig. 4- Observed versus simulated grain yields with the DSSAT-Nwheat model for wheat cultivars a) Shahriyar, b) Pishtaz, c) Tajan, and d) Chamran

خط ۱:۱ و پارامترهای آماری نتایج اعتبارسنجی در شکل نشان داده شده است.

Line 1:1 and statistics for evaluating model performance were shown in each graph.

اندرزیان و همکاران (Andarzian et al., 2008) برای گندم رقم چمران در شرایط اقلیمی اهواز با مدل CERES-Wheat به پیش‌بینی مراحل فنولوژیکی و عملکرد پرداختند و به RMSE ۲/۵ روز برای تاریخ گرده‌افشانی، پنج روز برای رسیدگی فیزیولوژیک و ۴۶۵ کیلوگرم در هکتار برای عملکرد دانه رسیدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی و عملکرد با DSSAT توسط ماهرو و همکاران (Mahru et al., 2010) برای چهار رقم گندم در استان گلستان نشان داد که مدل با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی نموده است و مقدار RMSE برای روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی به‌ترتیب ۴/۲ و ۵/۷ روز و برای عملکرد ۶۶۸ کیلوگرم در هکتار بود. به‌رغم وجود این گزارش‌ها که تماماً دقت کالیبراسیون را خوب ارزیابی کرده‌اند، یک ضعف عمده در این تحقیقات وجود دارد و آن استفاده از داده‌های محلی برای برآورد پارامترهای مدل می‌باشد.

جدول ٦- نتایج واسنجی مدل برای شبیه‌سازی روز تا گرده‌افشانی، روز تا رسیدگی و عملکرد دانه چهار رقم گندم
Table 6- Summary of model calibration for predicting anthesis and maturity days and grain yield for four wheat cultivars

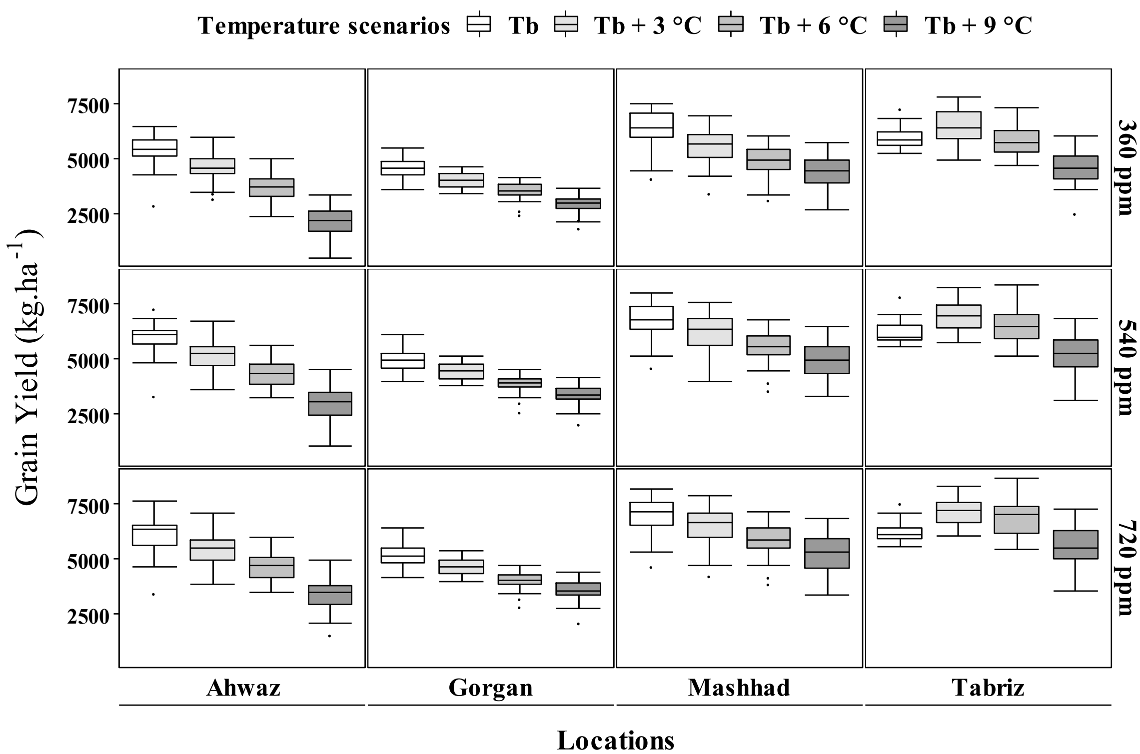
صفات Variable	آماره Evaluation stat	شهریار Shahriyar	پیشتاز Pishtaz	تجن Tajan	چمران Chamran
روز تا گل‌دهی	RMSE	2.62	2.59	2.60	3.78
Anthesis day	nRMSE (%)	1.51	1.49	1.50	2.18
	d	0.99	0.98	1.00	0.99
	R^2 (1:1)	0.98	0.96	0.99	0.98
روز تا رسیدگی	RMSE	2.98	3.24	2.74	3.49
Maturity day	nRMSE (%)	1.36	1.48	1.25	1.59
	d	0.99	0.98	1.00	1.00
	R^2 (1:1)	0.97	0.91	0.99	0.99
عملکرد دانه	RMSE	708	559	536	722
Grain yield	nRMSE (%)	12.6	9.9	9.5	12.8
	d	0.65	0.77	0.84	0.90
	R^2 (1:1)	0.19	0.45	0.57	0.71

به‌دلیل وجود برهم‌کنش‌های پیچیده ژنتیکی، شرایط اقلیمی و شیوه‌های مدیریت، استفاده از داده‌های محلی نمی‌تواند به برآورد دقیق ضرایب ژنتیکی منجر شود (Kassie et al., 2016). ارزیابی جامع مدل‌های شبیه‌سازی محصول با مجموعه داده‌های کافی از محیط‌های مختلف، مدیریت، ارقام و انواع خاک برای استفاده از یک مدل محصول با اطمینان در تجزیه و تحلیل سیستم‌های کشاورزی حیاتی است (White et al., 2011). بنابراین، در مطالعه حاضر از مدل DSSAT-Nwheat که با داده‌هایی با طیف گسترده‌ای از مدیریت و شرایط محیطی مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفته است، می‌توان برای ارزیابی اثرات مختلف مدیریت زراعی و تصمیم‌گیری در نظام‌های کشت گندم در شرایط اقلیمی مختلف کشور استفاده کرد.

حساسیت مدل به پارامترهای تغییر اقلیم: نتایج آنالیز حساسیت مدل DSSAT-Nwheat به افزایش دما و غلظت CO_2 در شکل ۵ نشان داده شده است. واکنش مدل به افزایش دما در مناطق مختلف و سطوح مختلف CO_2 متفاوت بود؛ به‌طوری‌که در منطقه اهواز افزایش دما تا نه درجه سانتی‌گراد در سطوح غلظت ۳۶۰، ۵۴۰ و ۷۲۰ پی‌پی‌ام CO_2 اتمسفر، به‌ترتیب باعث کاهش ۶۰، ۵۰ و ۴۶ درصدی عملکرد دانه شد؛ این کاهش عملکرد برای منطقه گرگان ۳۶، ۳۲ و ۳۱ درصد و برای منطقه مشهد ۳۲، ۲۸ و ۲۵ درصد بود (شکل ۵). همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش CO_2 مقداری از اثرات منفی گرما را تخفیف داده است. امّا در منطقه سردسیر تبریز افزایش سه درجه سانتی‌گراد دما در سطوح غلظت ۳۶۰، ۵۴۰ و ۷۲۰ پی‌پی‌ام CO_2 به‌ترتیب باعث افزایش ۸، ۱۲ و ۱۴ درصدی عملکرد دانه شده است؛ ولی با افزایش بیشتر دما تا نه درجه سانتی‌گراد، عملکرد دانه ۲۳، ۱۵ و ۱۰ درصد نسبت به دمای پایه کاهش یافت (شکل ۵). در مطالعه کاسی و همکاران (Kassie et al., 2016) نیز افزایش شش درجه سانتی‌گراد دما باعث کاهش ۱۷ درصدی عملکرد در هلند و همچنین افزایش نه درجه سانتی‌گراد دما باعث کاهش ۴۲ درصدی عملکرد در استرالیا شد.

افزایش غلظت CO_2 از ۳۶۰ تا ۷۲۰ پی‌پی‌ام در دمای پایه، عملکرد دانه شبیه‌سازی شده را برای مناطق تبریز، مشهد، گرگان و اهواز به‌ترتیب ۴، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ درصد افزایش داد (شکل ۵). بیشترین اثر افزایش CO_2 در شرایط افزایش نه درجه سانتی‌گراد دما در منطقه اهواز بود که توانست ۵۶ درصد عملکرد دانه را بهبود بخشد (شکل ۵). حساسیت متفاوت مدل در مناطق اقلیمی به این پارامترهای تغییر اقلیم نشان از کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی است و می‌توان با اطمینان از این مدل کالیبره شده در مطالعات تغییر اقلیم استفاده کرد. دما و CO_2 بر فرآیندهای مختلف رشد و نمو محصول، هدایت روزنه‌ای و سرعت فرآیندهای فیزیولوژیکی تأثیر می‌گذارند. رابطه بین نمو محصول و پاسخ‌های دما در مدل‌های مختلف، متفاوت است. به‌عنوان مثال، مدل DSSAT-Nwheat یک فاکتور برای افزایش سرعت زوال برگ در پاسخ به دمای شدید دارد. DSSAT-Nwheat تأثیر افزایش غلظت CO_2 بر رشد محصول، کارایی مصرف تشعشع (RUE) و کارایی تعرق (TE) را بر اساس یک تابع مستقل -RUE CO_2-Temprature و یک تابع مستقل CO_2-TE شبیه‌سازی می‌کند (Reyenga et al., 1999). نتایج آزمایش‌های واقعی اثر افزایش

دی‌اکسید کربن آزاد هوا بر عملکرد گندم در آمریکا (Kimball, 2006; Kimball et al., 1995; Wall et al., 2006)، آلمان (Ewert et al., 2002) و چین (Li et al., 2007; Ynag et al., 2007) نشان از افزایش ۳۵-۶ درصدی عملکرد دانه دارد که قابل مقایسه با نتایج این تحقیق است. کاسی و همکاران (Kassie et al., 2016) نیز گزارش کردند که در شرایط اقلیمی استرالیا، با افزایش غلظت CO_2 اتمسفر از ۳۶۰ تا ۷۲۰ پی‌پی‌ام عملکرد شبیه‌سازی شده در مدل DSSAT-Nwheat، ۱۰ درصد افزایش یافت که البته این مقدار افزایش در مدل‌های CERES و CROPSIM به‌ترتیب ۳۲ و ۲۴ درصد بود. افزایش غلظت CO_2 باعث افزایش کارایی مصرف آب (WUE) از طریق بسته شدن نسبی روزنه‌ها برای تنظیم شار مولکول CO_2 می‌شود. به همین دلیل افزایش نسبی عملکرد دانه با افزایش غلظت CO_2 در شرایط تنش آب بیشتر است (Kassie et al., 2016). چون کاهش هدایت روزنه‌ای به‌طور مستقیم در مدل Nwheat شبیه‌سازی نمی‌شود، این اثر از طریق افزایش کارایی مصرف تعرق در شرایط افزایش غلظت CO_2 لحاظ می‌شود (Asseng et al., 2004).



شکل ۵- حساسیت مدل DSSAT-Nwheat به سطوح مختلف افزایش دما و CO_2 در مناطق مختلف اقلیمی

Fig. 5- Sensitivity of the DSSAT-Nwheat model to levels of temperature and CO_2 concentrations in different climate regions

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که مدل DSSAT-Nwheat پاسخ‌های عملکرد دانه به طیف گسترده‌ای از مدیریت و شرایط محیطی را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. این مدل کالیبره شده هم‌اکنون می‌تواند برای ارزیابی تأثیرات مختلف مدیریت زراعی و تصمیم‌گیری در نظام‌های کشت گندم در شرایط اقلیمی جاری و آینده مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این مدل می‌تواند برای بررسی اثرات دما، CO_2، آب، مواد مغذی و شیوه‌های مدیریت زراعی در طیف وسیعی از محیط‌های رشد گندم مورد استفاده قرار گیرد.

References

Andarzian, B., Bakhshande, A.M., Bannayan, M., and Emam, Y., 2008. Evaluation of the CERES-wheat model in Ahvaz condition. Journal of Agronomy Research of Iran 6: 11-22. (In Persian with English Summary)

Angulo, C., Rotter, R., Lock, R., Enders, A., Fronzek, S., and Ewert, F., 2013. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. Agricultural and Forest Meteorology 170: 32–46.

Asseng, S., Jamieson, P.D., Kimball, B., Pinter, P., Sayre, K., Bowden, J.W., and Howden, S.M., 2004. Simulated wheat growth affected by rising temperature: increased water deficit and elevated atmospheric CO_2. Field Crops Research 85(2-3): 85-102.

Asseng, S., Keating, B.A., Fillery, I.R.P., Gregory, P.J., Bowden, J.W., Turner, N.C., Palta, J.A., and Abrecht, D.G., 1998. Performance of the APSIM-wheat model in Western Australia. Field Crops Research 57(2): 16-179.

Asseng, S., Milroy, S.P., and Poole, M.L., 2008. Systems analysis of wheat production on low water-holding soils in a Mediterranean-type environment I. Yield potential and quality. Field Crops Research 105(1-2): 97-106.

Bannayan, M., Crout, N.M.J., and Hoogenboom, G., 2003. Application of the CERES-wheat model for within-season prediction of winter wheat yields in the United Kingdom. Agronomy Journal 95: 114-125.

Bassu, S., Asseng, S., and Richards, R., 2011. Yield benefits of triticale traits for wheat under current and future climates. Field Crops Research 124(1): 14-24.

Esmaeilzadeh Moghaddam, M., Lotfali Aineh, G., Akbarimghadam, H., Abedini, M., Tahmasbi, S., Farhadnato, M., Seyahfer, M., Maghsoudinezhad, K., Poodineh, A., Shirvani, A., Sanei Nejad, A., Shahbazpour, A., Tahmasbi, S., Amir Bakhtiar, N., Nikzad, A.R., Tabibbaghfari, M., Abdollahi, A., Mardani, M., and Jokar, K., 2011. Final report: Evaluation of adaptability of wheat genotypes in elite regional wheat yield trials (ERWYT79-89) of Warm Southern Zone (Zone-II). Cereal Research Department, Seed and Plant Improvement Institute-SPII, Karaj, Iran. (In Persian)

Fath, B., and Jorgensen, S.E., 2011. Fundamentals of Ecological Modelling: Applications in Environmental Management and Research, (4th Ed.). Elsevier, Amsterdam.

Heng, L.K., Asseng, S., Mejahed, K., and Rusan, M., 2007. Optimizing wheat productivity in two rainfed environments of the West Asia-North Africa region using a simulation model. European Journal of Agronomy 26(2): 121-129.

Holzworth, D.P., Huth, N.I., Devoil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., Van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A.D., Brown, H., Whish, J.P.M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L.W., Peake, A.S., Poulton, P.L., Hochman, Z., Thorburn, P.J., Gaydon, D.S., Dalgliesh, N.P., Rodriguez, D., Cox, H., Chapman, S., Doherty, A., Teixeira, E., Sharp, J., Cichota, R., Vogeler, I., Li, F.Y., Wang, E.L., Hammer, G.L., Robertson, M.J., Dimes, J.P., Whitbread, A.M., Hunt, J., van Rees, H., McClelland, T., Carberry, P.S., Hargreaves, J.N.G., MacLeod, N., McDonald, C., Harsdorf, J., Wedgwood, S., and Keating, B.A., 2014. APSIM–evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. Environmental Modelling and Software 62: 327-350.

Hoogenboom, G., Porter, C.H., Shelia, V., Boote, K.J., Singh, U., White, J.W., Hunt, L.A., Ogoshi, R., Lizaso, J.I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., Moreno, L.P., and Jones, J.W., 2017. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 (https://DSSAT.net). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.

Hoogenboom, G., Wilkens, P.W., and Tsuji, G.Y., 1999. DSSAT v3, Vol. 4. University of Hawaii, Honolulu, HI.

Hussain, J., Khaliq, T., Ahmad, A., and Akhtar, J., 2018. Performance of four crop models for simulations of wheat phenology, leaf growth, biomass and yield across planting dates. PLoS One 13(6): 1-14.

Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., and Ritchie, J.T., 2003. DSSAT Cropping System Model. European Journal of Agronomy 18: 235-265.

Kassie, B.T., Asseng, S., Porter, C.H., and Royce, F.S., 2016. Performance of DSSAT-Nwheat across a wide range of current and future growing conditions. European Journal of Agronomy 81:27-36.

Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., and Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM: a model designed for farming systems simulation. European Journal of Agronomy 18(3-4): 67-288.

Keating, B.A., Meinke, H., Probert, M.E., Huth, N.I., and Hills, I.G., 2001. NWheat: Documentation and Performance

of a Wheat Module for APSIM. CSIRO Australia: Tropical Agriculture Technical Memorandum 9: 66pp.
Kiani, A., Koocheki, A.R., Nassiri Mahallati, M., and Banayan, M., 2004. CERES-Wheat model evaluation at two different climatic in Khorasan province, Π Phenology and growth parameter simulation. Journal of Desert 9: 125-142. (In Persian with English Summary)
Liu, B., Asseng, S., Liu, L.L., Tang, L., Cao, W.X., and Zhu, Y., 2016. Testing the responses of four wheat crop models to heat stress at anthesis and grain filling. Global Change Biology 22: 1890-1903.
Mahru, A.H., Soltani, A., Galeshi, S., and Kalate-Arabi, M., 2010. Estimates of genetic coefficients and evaluation of model DSSAT for Golestan province. Electronic Journal of Crop Production 3(2): 229-253. (In Persian with English Summary)
Matthews, R.B., Rivington, M., Muhammed, S., Newton, A.C., and Hallett, P.D., 2013. Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: the role of crop modelling. Global Food Security 2(1):24-28.
Najafi Mirok, T., Rezaei, M., Chaychi, M., Babaei, T., Sanjari, A., Ghodsi, M., Razavi, A.R., Yazdansepas, A., Torabi, M., Hooshyar, R., Atahosseini, M., AliSafavi, S., Mahfouzi, S., Aminzadeh, G., Nazeri, M., Rezaie, A., Jasemi, S., Ghorbani, A., and Amini, A., 2011. Final Report: Evaluation of adaptability of wheat genotypes in elite regional wheat yield trials (ERWYT81-89) of Cold Zone (Zone-IV). Cereal Research Department, Seed and Plant Improvement Institute-SPII, Karaj, Iran. (In Persian)
Najafian, G., Ahmadi, G., Qandi, A., Shabanzadeh, B., Sarikhani, S., Jafarnejad, A., Hassanpour, J., Zare Faizabadi, A., HajAkhonde Meybodi, H., Mohammadkhani, A., Nategh, Z., Jokar, R., Ghavidel, N., Niazi, A., Sahraee, M., Minoo, J., Kalameh, A., Ammarloo, M., Nazari Beyranvand, H., Sadeghi, D., Dehghani, M.H., Mansouri, J., Tabeie., M., and Kohistani, B., 2010. Final Report: Evaluation of adaptability of wheat genotypes in elite regional wheat yield trials (ERWYT82-88) of Temperate Zone (Zone-III). Cereal Research Department, Seed and Plant Improvement Institute-SPII, Karaj, Iran. (In Persian)
Nouri, M., Homaee, M., Bannayan, M., and Hoogenboom, G., 2016. Towards modeling soil texture-specific sensitivity of wheat yield and water balance to climatic changes. Agricultural Water Management 177: 248-263.
O'Leary, G., Christy, B., Nuttall, J., Huth, N., Cammarano, D., Stockle, C., Basso, B., Shcherbak, I., Fitzgerald, G., Luo, Q., Farre-Codina, I., Palta, J., and Asseng, S., 2015. Response of wheat growth, grain yield and water use to elevated CO_2 under a free-air CO_2 enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi-arid environment. Global Change Biology 21(7): 2670-2686.
Oteng-Darko, P., Yeboah, S., Addy, S.N.T., Amponsah, S. and Owusu Danquah, E., 2013. Crop modeling: A tool for agricultural research – A review. E3 Journal of Agricultural Research and Development (EJARD) 2(1): 1-6.
Reyenga, P.J., Howden, S.M., Meinke, H., and McKeon, G.M., 1999. Modelling global change impacts on wheat cropping in south-east Queensland, Australia. Environmental Modelling and Software 14(4): 297-306.
Ritchie, J.T., Singh, U., Godwin, D., and Bowen, W.T., 1998. Cereal growth, development, and yield. In: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P.K. Thornton (Eds.). Understanding Options for Agricultural Production. The Netherlands: Kluwer Academic, Dordrecht, p. 79-98.
Saadati, Z., Delbari, M., Amiri, E., Panahi, M., Rahimian, M.H., and Ghodsi, M., 2016. Assessment of CERES-Wheat model in simulation of varieties of wheat yield under different irrigation treatments. Journal of Water and Soil Resources Conservation 5(3): 73-85. (In Persian with English Summary)
Sinclair, T.R., and Seligman, N., 2000. Criteria for publishing papers on crop modeling. Field Crops Research 68: 165-172.
Singh, A.K., Tripathy, R., and Chopra, U.K., 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. Agricultural Water Management 95(7): 776-786.
Soltani, A., Hammer, G.L., Torabi, B., Robertson, M.J., and Zeinali, E., 2006. Modeling chickpea growth and development: phonological development. Field Crops Research 99: 1-13.
SPII (Seed and Plant Improvement Institute)., 2015. Introduce of crops cultivars (Food Security and Health, Vol. 1) Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Karaj, Iran. (In Persian)
Vahabzadeh, M., Kalateh, M., Jafarbayeh, J., Khavareinejad, M.S., Ghasemi, M., Souqi, H., Sheikh, F., Afshari, F., Ebrahimnejad, S., Dehghan, M.A., Naseri, A., Babaei Gol, A., Morteza Gholi, M., Khalilzadeh, G., Nouri, T., Abrodi, A.M. Saeedi, A., Fallah, H., Aminzadeh, G., and Lotfinejad, L., 2008. Final Report: Evaluation of adaptability of wheat genotypes in elite regional wheat yield trials (ERWYT79-86) of North Warm and Humid Zone

(Zone-I). Cereal Research Department, Seed and Plant Improvement Institute-SPII, Karaj, Iran. (In Persian)
Wang, X., Kemanian, A., and Williams, J., 2011. Special features of the EPIC and APEX modeling package and procedures for parameterization, calibration, validation, and applications. In: L.R. Ahuja and L. Ma (Eds.). Methods of Introducing System Models into Agricultural Research. American Society of Agronomy, Madison. p. 177-208.
White, J.W., Hoogenboom, G., Kimball, B.A., and Wall, G.W., 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. Field Crops Research 124(3): 357-368.
Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of American Meteorology Society 63: 1309-1313.
Yang, J.M., Yang, J.Y., Liu, S., and Hoogenboom, G., 2014. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. Agricultural Systems 127: 81–89.
Zacharias, M., Kumar, S.N., Singh, S.D., Swaroopa, D.N., and Aggarwal, P.K., 2015. Evaluation of a regional climate model for impact assessment of climate change on crop productivity in the tropics. Current Science 108(6): 1119-1126.

Journal of Agroecology
Vol. 12, No.4, Winter 2021, p. 561-580

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، ص ۵۸۰-۵۶۱

Evaluation of DSSAT-Nwheat Model across a Wide Range of Climate Conditions in Iran

M. Fallah[1], A. Nezami[2*], H. Khazaie[2] and M. Nassiri Mahallati[2]
Submitted: 12-12-2018
Accepted: 23-06-2019

Fallah, M., Nezami, A., Khazaie, H., and Nassiri Mahallati, M., 2021. Evaluation of DSSAT-Nwheat model across a wide range of climate conditions in Iran. Journal of Agroecology 12(4):561-580

Introduction

Crop models can integrate the complex interactions of soil properties, climatic conditions, crop management practices, and crop genetic characteristics. One of the main aspects of crop simulation models is the possibility to use them across various environmental and management conditions, provided that they have been evaluated under a wide range of growing conditions. The Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) modeling platform is leading crop modeling system that is widely applied in various environments. Testing crop models under various temperature environments are essential to apply models to climate impact studies. The objective of this study was the testing and evaluation of DSSAT-Nwheat model across a wide range of climate conditions in Iran.

Materials and Methods

Nwheat model, which recently integrated into DSSAT, was evaluated for four wheat cultivars using observations from field experiments included a wide range of climate and management. Cultivars were Shahriyar, Pishtaz, Tajan, and Chamran cultivated in cold, temperate, humid and tropical regions in Iran, respectively. The locations represent four different wheat mega-environments, a concept used by wheat breeders for testing cultivars. The management information used at each site was obtained from the Seed and Plant Improvement Institute. Daily weather data, management events, and soil characteristics imported to DSSAT. The performance of the DSSAT-Nwheat during the calibration and evaluation was assessed using different statistics, Root Mean Square Error (RMSE), Normalized Root Mean Square Error (nRMSE), Willmott's index (d), and coefficient of determination (R^2) of a 1:1 regression line. A sensitivity analysis was conducted using 30 years of observed weather data from Tabriz, Mashhad, Gorgan, and Ahwaz. For the sensitivity analysis scenarios, the temperaturewas increased by 3, 6, and 9°C, and atmospheric CO_2 concentration levels were set at 360, 540, and 720 ppm.

Results and Discussion

Evaluation results showed that DSSAT-Nwheat model simulated planting to anthesis and planting to maturity accurately with RMSE values less than four days, nRMSE less than 3%, and d index close to one. Also, evaluation of grain yield showed that RMSE varied from 568 kg ha^{-1} for Tajan cultivar up to 933 kg ha^{-1} for Chamran cultivar. In general, nRMSE and d index for grain yield were less than 20% and higher than 0.8, respectively, which showed good calibration accuracy. In DSSAT-Nwheat model, the specific heat stress function explains heat stress effects during grain filling on grain yield in cultivars. Chamran cultivar is somewhat resistant to end season heat stress, so the DSSAT-Nwheat model underestimated in the warm regions. Because the cultivars differ regarding resistance to the end season heat stress, crop models need to consider cultivar-specific tolerance to heat stress to better simulate temperature effects on wheat cropping systems. The response

1- Ph.D. in Crop Ecology, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
2- Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
(*- Corresponding Author Email: nezami@um.ac.ir)
Doi:10.22067/jag.v12i4.7

of the model to the increase in temperature was different in regions and levels of CO_2 concentrations. Elevated atmospheric CO_2 concentrations lessened some of the adverse effects of high temperature. Therefore, the sensitivity analysis of DSSAT-Nwheat model to temperature variations and elevated atmospheric CO_2 concentrations showed that the model could be used in studies of climate change impacts on wheat production. This model can be employed to explore the integrated effects of temperature, atmospheric CO_2concentrations, water, nutrients, and agronomic management practices in a range of wheat growing environments.

Conclusion

The results of this study showed that the DSSAT-Nwheat model had reliably good performance under a wide range of management and environmental conditions. This calibrated model can now be used for assessing impacts of various agronomic management strategies and decisions in wheat cropping systems under current and anticipated climate change. But more importantly is the calibration method and using a large number of climatological data to calibrate.

Keywords: Climate change, Developmental stages, Genetic coefficients, Modeling, Sensitivity analysis